第24卷 第2期 电子设计工程 2016年1月
Vol.24 No.2 Electronic Design Engineering Jan. 2016

贪婪型动态数字复接器设计与时延分析

石立国[1,2]，王竹刚[2]，熊蔚明[2]，候鸿杰[1,2]
（1. 中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190；2.中国科学院大学 北京 100190）

摘要：为了节省信道资源，可以将多路不同速率、不同猝发时隙的数字信源复合为一路数据的异步数字复接器得到了广泛应用。为了尽最大可能降低源包数据传输时延、提高信道利用率，提出了一种贪婪型异步动态数字复接器的设计方案，并给出了各路信源的优先级调度策略。使用硬件描述语言对两种复接模型进行描述。在不同物理帧和两种信源模式下，通过Modelsim对贪婪型动态复接器和虚拟信道复接器进行了仿真对比。仿真结果表明，贪婪型动态复接的平均传输时延和时延抖动都优于虚拟信道复接，并能够更有效地节省信源缓存资源。

关键词：数字复接器；虚拟信道；平均传输时延；时延抖动
中图分类号：TN914.3 **文献标识码**：A **文章编号**：1674-6236(2016)02-0142-04

Design of greedy dynamic digital multiplexer and its analysis of time delay

SHI Li-guo[1,2], WANG Zhu-gang[2], XIONG Wei-ming[2], HOU Hong-jie[1,2]
(1. *Center for Space Science and Applied Research of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190, *China*)

Abstract: In order to save channel resources, asynchronous digital multiplexer, which can multiplex different rate, different burst time slot digital source, has been widely applied. Aims to reduce the maximum extent possible source packet data transmission delay, improve channel utilization, design scheme of a greedy asynchronous dynamic digital multiplexer is proposed. The priority scheduling strategy of sources is given too. Two kinds of multiplex model are described by hardware description language. Simulations for greedy dynamic multiplexer and virtual channel multiplexer, under the condition of different physical frame length and two source model, have been carried out by Modelsim. The simulation results show that, for the average transmission delay and delay jitter, the greedy dynamic multiplexing is superior to the virtual channel multiplexing, and is more effective in saving resource of source cache.

Key words: digital multiplexer; virtual channel; average transmission delay; delay jitter

DOI:10.14022/j.cnki.dzsjgc.2016.02.044

在复杂的现代数字通信系统中，所需传输的数字信源往往有很多个。为了提高传输的效率，扩大传输的容量，依据时分复用原理实现的数字信号复接与分接已经广泛应用于很多系统中。数字复接器(Digital Multiplexer)与分解器(Digital Demultiplexer）将不同速率、不同类型的信号进行合并与分离，以实现通过一条信道完成多个信源信号传输的目的。根据复接器与各个信源时钟的不同关系，数字复接器可分为同步复接器[1]和异步复接器。前者对于信源的相位、速率等要求较严，应用的范围相对较窄；后者可以适用于速率、相位、发生间隔等各不相同的多个数字信源的传输，应用较为广泛[2]。许多高校对同步复接器及其缺点进行了研究，并通过码率调整的方式将异步复接变为同步复接[1,3-5]，这种实现方式由于插入了许多无用脉冲，降低了信道利用率，并引入了不必要的时延抖动。

目前应用比较广泛的一种复接器被称为虚拟信道复接器[6]。文中根据数字复接器的实现方式，提出了一种新的复接方式：贪婪型动态复接器，并对贪婪型动态复接器和虚拟信道复接器进行了时延分析和对比，以明确其特点和应用场景，目的是提高通信系统的性能。

1 信源要求及物理帧模型

在实际的通信系统中，通常要完成不同速率、不同类型信号的复接。不同信号之间的差别可能很大，具体如下：

1）信号速率差别相当大。光纤信号可以达到Gbps，而音频、控制数据等仅仅只有几十Kbps，甚至更低；

2）对时延的要求不同。有些信号要求有尽可能短的时间延迟，另外还有一些信号对时延不是特别敏感；

3）信源速率可能动态变化。比如视频信号，在通信质量好的情况下，可以按照高清的模式进行传输，在通信质量差的情况下，可以考虑低画质传输，其速率差别很大，范围从几百Kbps到几Mbps不等。

收稿日期：2015-06-22 稿件编号：201506202
基金项目：国家863计划资助项目(Y28021A220)
作者简介：石立国(1984—)，男，山东临清人，博士研究生。研究方向：信号与信息处理、信号检测与估计。

文中假设有 4 个信源，命名为：S1~S4，其平均速率分别为 40 Mbps、5 Mbps、4 Mbps 和 1 Mbps，对时延的需求程度从 S1 到 S4 递减。并且这 4 个信源设置为匀速模式和短时间猝发模式两种。从 S1 到 S4 每个信源的数据包包长分别为 4 096 Bytes，2 048 Bytes，1 024 Bytes，512 Bytes。数据包的包头都为 2 Bytes，其格式如表 1 所示。

表1　信源数据包结构

Tab.1　Source packet structure

信源	包头	包计数	数据域
S1	0xEB91	8 Bytes	4 086 Bytes
S2	0xEB92	8 Bytes	2 038 Bytes
S3	0xEB93	8 Bytes	1 014 Bytes
S4	0xEB94	8 Bytes	502 Bytes

物理帧帧长可以是固定的，也可以是可变的（例如：Prox-1 协议）。对于固定帧长而言，数据的解调处理比较简单，同时也可以使用固定长度的编解码方式；可变帧长的解调处理，尤其是帧同步比较复杂。文中假设了 5 种固定帧长的物理帧格式，帧长分别为 256 Bytes、512 Bytes、1 024 Bytes、2 048 Bytes、4 096 Bytes，其中帧头 4 Bytes，帧计数 7 Bytes，数据域长度分别为：213 Bytes、447 Bytes、885 Bytes、1 781 Bytes、3 573 Bytes，剩余部分都是校验位。编码采用 CCSDS 标准的 RS(255，223)。物理帧格式如表 2 所示。

表 2　物理帧结构

Tab.2　Physical frame structure

物理帧长 (Bytes)	帧头 (Bytes)	帧计数 (Bytes)	数据域 (Bytes)	校验位 (Bytes)
256	4	7	213	32
512	4	7	447	64
1 024	4	7	885	128
2 048	4	7	1 781	256
4 096	4	7	3 573	512

在本文中所设计的模型中，由于总信源码速率为 50 Mbps，因此可以计算得出最大基带码速率为

$$f_b=\frac{256}{213}\cdot 50\ \text{Mbps}\approx 60.09\ \text{Mbps} \tag{1}$$

留有一定余量，取基带码速率为 62 Mbps。

2　贪婪型动态复接器设计

文中设计和分析的数字复接器是异步的。因此，在信源数据进入到复接器之前，先要进行缓存。采用图 1 的结构进行设计。

贪婪型动态复接的优点是使信源数据尽可能快的发送出去，尽最大可能降低时延，尽可能少的传输填充数据。对于物理帧中的数据域较短的情况，由于需要更少的标识符，带宽利用率会更优。

在第 1 节的信源和物理帧基础上，设计贪婪型动态复接包结构如表 3 所示。

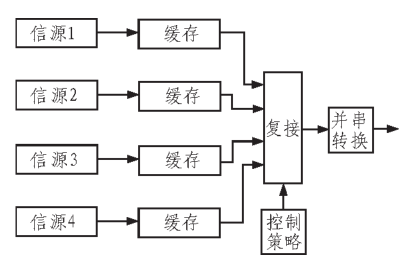


图 1　数字复接器结构

Fig. 1　Digital multiplexer structure

表3　贪婪型动态复接

Tab.3　Greedy dynamic multiplexing

总数据域长度	标识符	信源 S1	信源 S2	信源 S3	信源 S4
X Bytes	Y Bytes	L1 Bytes	L2 Bytes	L3 Bytes	L4 Bytes

其中，第一列总数据域代表物理帧中的数据域，第二列标识符代表信源在复接包中几种信源分配的标志。X、Y 的取值根据物理帧长取不同值。对于物理帧长为 256 Bytes 时，Y 取值 4，对于其他 4 种物理帧长，Y 取值 8；L1~L4 分别代表在一帧之中，对应信源的数据字节数。

以物理帧长 256 Bytes 为例，在贪婪型动态复接中，信源 S1~S4 的总数据域大小为 213 Bytes，4 Bytes 的标识符分别表示总数据域中对应信源所占数据字节个数。在物理帧组帧信号到来时，判读所有信源数据缓存个数，按照从 S1 到 S4 的优先级顺序，取出共 209 Bytes 数据，组成一个动态的复合帧。其调度策略如下：

①当信源 S1 的数据缓存中数据多于 209 Bytes，则对应信源 S1 的标识符为 0xD1，对应信源 S2~S4 的标识符全为 0x00，即 L1=209，L2=L3=L4=0，此时的总数据域中，仅包含信源 S1 的数据；

②若信源 S1 的数据缓存中数据少于 209 Bytes，令其值为 L1，则对应信源 S1 的标识符为 L1，并从后面优先级低的信源 S2 数据缓存中取出（209-L1）Bytes 数据（假设此时信源 S2 数据缓存中数据多于 209-L1 Bytes），令对应信源 S2 的标识符为 L2=209-L1，对应信源 S3、S4 的标识符为 L3=L4=0，此时的总数据域中，包含信源 S1 和 S2 的复合数据。

③若信源 S1 和 S2 的数据缓存中数据之和少于 209 Bytes，信源 S1、S2 和 S3 数据缓存中数据之和大于等于 209 Bytes，读出信源 S1 和 S2 数据缓存个数 L1 和 L2，令 L3=209-L1-L2，L4=0，此时的总数据域中，包含信源 S1、S2 和 S3 的复合数据。

④若信源 S1~ S3 的数据缓存中数据之和少于 209 Bytes，信源 S1~S4 数据缓存中数据之和大于等于 209 Bytes，读出信源 S1~S3 数据缓存个数 L1、L2、L3，令 L4=209-L1-L2-L3，此时的总数据域中，包含信源 S1~S4 的复合数据。

⑤若所有信源数据缓存中数据之和少于 209 Bytes，则令标识符分别为 L1、L2、L3、L4，此时的总数据域中，包含信源

S1~S4 的数据，并对后面的空闲数据域进行填充。

对应贪婪型动态复接的数字分接器的设计也非常简单，仅需要通过对应信源 S1~S4 的标识符判读，即可方便的分离总数据域中对应的信源数据。

3 虚拟信道复接器

虚拟信道复接方式是目前应用较多的方式之一，即一个信道分为多个虚拟信道，多个虚拟信道根据时分复用的原则，按照一定优先级的调度规则，分时独占信道。这种复接方式的调度算法对信道利用率、数据包的延时及所需的数据缓存大小均有非常大的影响。根据虚拟信道复接的数据源的调度算法，又可分为以下 3 种方式：全同步复用、全异步复用和同步、异步混合复用[7]。

在相同的信源、物理帧结构下，研究不同复接方式的性能才有意义。文中在第 1 节的信源和物理帧基础上，为了和贪婪型动态复接器进行对比，设计的虚拟信道复接包结构如表 4 所示。

表4 虚拟信道复接
Tab.4 Vitual channel multiplexing

总数据域长度	标识符	虚拟信道数据域
X Bytes	1 Bytes	X−1 Bytes

其中，X 代表意义同表 3。按照信源码速率的大小，将信源 S1~S4 的优先级按照码速率从低到高的顺序进行优先级调度。物理帧组帧信号到来时，当信源 S1 缓存数据达到 X−1 Bytes 以上，则不考虑信源 S2~S4，由信源 S1 占用物理信道；当信源 S1 缓存数据小于 X−1 Bytes 时，则对信源 S2 缓存进行判读，若其缓存数据大于 X−1 Bytes，则由信源 S2 占用物理信道。依次类推，直到最低优先级的虚拟信道。

这种设计方法对信源的码速率、是否猝发等的要求不高，是目前数字复接器应用较多的方法之一。缺点是信源缓存中的数据若长时间不足 X−1 Bytes，则会一直残留在缓存中[8]。

4 仿真分析

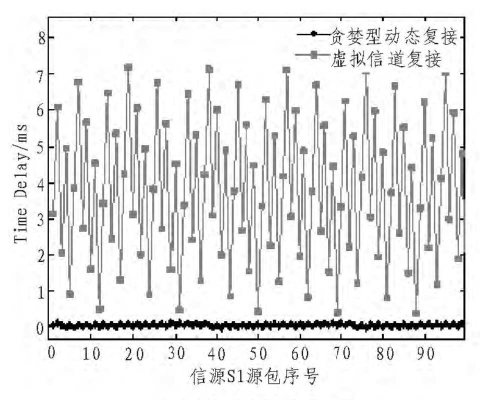
4 路数字信源采用 2 种模式：匀速模式和猝发模式。匀速模式时，信源 S1~S4 的码速率依次为：40 Mbps、5 Mbps、4 Mbps 和 1 Mbps；猝发模式时，发送时间以 0.1 ms 为单位周期，在单位周期内，每个信源以较高的速率随机猝发一次，信源 S1~S4 猝发码速率依次为：320 Mbps、40 Mbps、32 Mbps 和 8 Mbps，其平均速率同匀速模式。

物理帧设置的主要参数有基带速率和帧结构，详细设置参见 1.1 节。数字复接器选择了两种：虚拟信道复接和贪婪型动态复接。采用 VHDL 语言对仿真模型进行描述，并采集仿真数据。本设计旨在模拟数字复接器的时延性能，因此没有将载波同步、位同步、加解扰和编解码等模块带来的时延考虑在内。

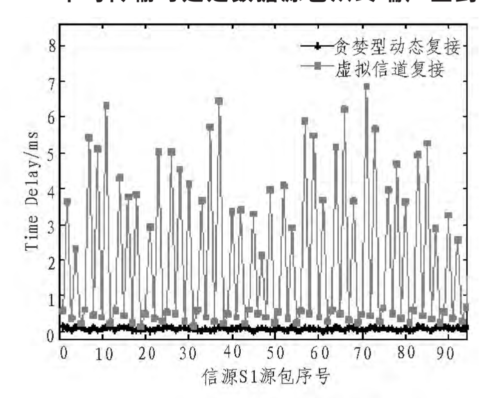
基于上述的仿真场景，进行了二十次仿真，即在两种信源模式和五种物理帧长条件下，分别对两种复接方式进行了仿真。图 2 给出了信源 S1 在物理帧长为 1 024 Bytes 时，匀速模式和猝发模式下，两种复接方式下每个数据源包的延时对比。

从图 2 中可以看到，在两种模式下，贪婪型动态复接方式的绝大多数数据源包的时延都小于虚拟信道复接方式。

平均传输时延是数据源包从终端产生到成功的传输到



(a)匀速模式下时延结果
(a)delay results of the uniform mode



(b)猝发模式下时延结果
(b)delay results of the burst mode

图 2 信源 S1 时延结果
Fig. 2 Delay results of source S1

接入点的平均时间间隔，其值的大小，依赖于源包的长度，包长越大，时延越大。可以看出，贪婪型动态复接的平均时延优于虚拟信道复接。对于优先级较高的信源 S1，甚至相差 2 个数量级。

变化的时延被称为时延抖动(Jitter)，抖动大多起源于传输中的队列和缓存，尤其是在低速链路中，时延抖动非常明显。抖动的产生是随机的，而且无法避免。通常将大包拆小，来减少大包对时延的影响。

在某些特定的应用环境中，要求数据包的传输时延相对稳定，也就是相对较小的源包传输时延抖动。从图 2 中可以看出，贪婪型动态复接信源 S1 的时延稳定在一个较小的范围之内，最大传输时延也非常小。结果表明，贪婪型动态复接优于虚拟信道复接。

对于虚拟信道复接，物理帧越长，意味着信源数据驻留

在缓存中的时间越长，所需要的缓存越大，传输时延越大；对于贪婪型动态复接，由于只要缓存中有多少数据，都会尽可能快的发送出去。所以，物理帧长的变化对贪婪型动态复接的影响较小。

5　结　论

文中所提出的贪婪型动态复接器已成功应用于某通信机，它具有优秀的传输时延性能。通过与虚拟信道复接器的时延性能对比，得出以下结论：

1）贪婪型动态复接的平均传输时延、时延抖动和最大传输时延，都优于虚拟信道复接。

2）物理帧的长度会影响贪婪型动态复接器虚拟信道复接器的时延性能，物理帧越长，平均传输时延、时延抖动和最大传输时延越大。其中虚拟信道复接器更加敏感。

3）由于贪婪型动态复接器尽可能快的将数据缓存中的数据发送出去，故所需的数据缓存少于虚拟信道复接。

参考文献：

[1] 徐孟祥. 基于FPGA的高速误码仪研制[D]. 长沙：国防科技大学，2005.

[2] LIU Yue-feng，ZHAO Guang-quan，PENG Xi-yuan. Design and implementation of simulator for AOS high-speed payload multiplexer [C]//. Proceedings of IEEE ICEMI'2013，2013: 285-290.

[3] 唐辉艳. 基于FPGA的实时仿真系统的设计与实现[D]. 北京：北京邮电大学，2011.

[4] 高广明. 正/零/负调整准同步/同步复接技术[J]. 通信学报，1981(4):60-65.

[5] 秦晟昱. 基于FPGA的多路复接器设计与实现[D]. 长沙：西安电子科技大学，2014.

[6] YANG Yi-kang，LI Xue，LIU Lei. 640 Mbps High-Rate Frame Multiplexer and its multi-channels control rule for CCSDS Principal Network [C] //. Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation，2010:4442-4445.

[7] 陈观兴. 高速可重构复接器的设计和实现[D]. 北京：中国科学院大学，2009.

[8] 张燕超. 基于可编程片上系统的复接器设计[D]. 北京：中国科学院大学，2012.

（上接第 141 页）

5　结　论

文中将 KNX 总线技术应用在智能照明控制系统当中，对这个系统的软件与硬件分别进行了选择与设计。近年来基于 KNX 技术的产品在国内的应用增长迅速，很多大型公共设施，如北京国际机场 T3 航站楼、上海浦东机场和上海世博园等，都使用了 KNX 技术。并且 KNX 在国内的应用有向民用住宅发展的趋势。国内也有越来越多的公司加入到使用 KNX 技术，甚至进行 KNX 产品的开发。KNX 目前存在的主要问题之一是价格较高，这阻止了 KNX 快速进入到民用建筑领域[6]。

参考文献：

[1] 王麟琨，王春喜，柳晓菁. KNX技术简介及特点分析[J]. 通讯与网络，2012，6(5):79-84.

[2] 胡兵，齐斌. KNX/EIB系统在酒店客房智能控制中的应用设计[J]. 现代建筑电气，2012，3(2):40-45.

[3] 董瑞，张宇，刘行健，等. 基于KNX的公共区域应急照明与智能照明系统集成设计[J]. 价值工程，2014，27:235-236.

[4] 吴金广，程大章. KNX总线技术推动楼宇自动化技术发展[J]. 智能建筑与城市信息，2004(6):32-39.

[5] 陈爽. 基于现场总线KNX 的楼宇自动化技术研究及产品开发[D]. 重庆：重庆大学，2007.

[6] 邹吉平. 基于现场总线的智能照明控制系统分析与应用[J]. 灯与照明，2005，29(3): 9-12.